

文章编号:2095-6002(2013)02-0001-06

引用格式:魏益民,魏帅,郭波莉,等. 含镉稻米的分布及治理技术概述. 食品科学技术学报,2013,31(2):1-6.

WEI Yi-min, WEI Shuai, GUO Bo-li, et al. Cadmium Contamination in Rice and Cadmium Control Technology. Journal of Food Science and Technology, 2013,31(2):1-6.

含镉稻米的分布及治理技术概述

魏益民, 魏帅, 郭波莉, 田阳

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

摘要: 镉是一种重要的重金属污染物,可经土壤、粉尘和农作物进入食物链。稻米易于富集土壤和环境中的镉,给消费者健康带来潜在风险。我国土壤中的镉含量存在地域不均一性,个别地区由于地质原因或工业、采矿污染,土壤镉含量偏高,导致当地生产的稻米镉超标。为应对稻米镉污染问题,目前已开展了土壤修复治理、水稻品种改良和稻米降镉加工利用等方面的研究。总结了我国土壤和稻米镉污染现状,分析了影响稻米富集镉的主要因素,概述了国内外稻米镉污染治理的新方法,为开展镉污染稻米治理及利用提供建议。

关键词: 稻米; 土壤; 镉; 污染; 治理技术

中图分类号: TS212

文献标志码: A

镉是环境中重要的有害重金属,可通过农作物进入食物链,威胁消费者健康。水稻是一种镉积累能力较强的农作物,污染区稻米产品的安全性一直受到广泛关注。近年来,国内研究报道主要集中在研究特定地区稻米镉含量特征。目前还缺少全国范围的调查研究,很难确切估计我国镉污染农田的面积及镉超标稻米总量。这一现实将给污染大米的流向和消费监管带来问题,给高危地区和高危消费人群带来潜在的健康风险。

稻米中的镉含量受品种、土壤等因素影响。根据镉在稻米中的富集规律,目前已研究出多种镉污染稻米的治理方法。本文分析了我国镉富集稻米的品种、区域特征,综述了国内外稻米镉污染治理方法,提出了解决稻米镉污染问题的对策建议。

1 镉污染现状

1.1 土壤污染

土壤是稻米中镉的主要来源,镉污染是威胁稻米安全的重要因素。随着工业、采矿业的发展,我国

土壤污染面积正逐渐扩大,污染程度逐步加重。1980年,我国工业三废污染土地面积266.7万 hm^2 ;1988年增加到666.7万 hm^2 ;1992年又增加到约1000万 hm^2 ^[1]。2007年,国土资源部发布报告称,我国受污染土地达到1.5亿亩(相当于1000万 hm^2),其中重金属污染粮食1200万t,直接经济损失超过200亿元^[2]。2010年,李雪林等^[3]报道我国受镉、砷、铬、铅等重金属污染的土地面积已近2000万 hm^2 ,约占耕地总面积的五分之一。2012年,王静等^[4]报道全国镉严重污染土地已超过1.33万 hm^2 。

国际上一般采用单因子污染指数法评价土壤中某一种污染物的污染程度。单因子污染指数等于土壤中污染元素的实测值与土壤中污染物限量标准的比值。根据《农田土壤环境质量监测技术规范, NY/T395—2012》规定,具体分级标准为:安全级(污染指数 ≤ 0.7),警戒级($0.7 < \text{污染指数} \leq 1$),轻度污染($1 < \text{污染指数} \leq 2$),中度污染($2 < \text{污染指数} \leq 3$),重度污染(污染指数 > 3)。

受地质区划影响,我国土壤镉含量呈现不均一

收稿日期:2013-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31201457)。

作者简介:魏益民,男,教授,博士生导师,主要从事农产品质量与食品安全方面的研究。

分布,随着工业和采矿业发展,不同地区土壤中的镉含量也在发生变化. 1993年,魏复盛等^[5-6]调查研究表明,我国土壤中镉含量规律为:西部地区>中部地区>东部地区,北方地区>南方地区. 而从近年来的文献报道可以看出,我国镉污染已呈现出南方地区>北方地区的趋势,特别是湖南、广西、贵州已成为镉污染较为严重的地区.

20世纪70~80年代,我国土壤镉污染主要集中在北方老工业区周围,范围较小. 陈涛等^[7]报道了沈阳市张士灌区镉污染调查结果. 1975年,张士灌区糙米镉含量平均为1 mg/kg;1979年,经过治理降为0.4 mg/kg. 1997年,王凯荣等^[8]研究表明,沈阳市张士灌区土地严重污染面积已降至总面积的13%.

20世纪90年代,我国南方地区开始出现土壤镉污染达到警戒级或轻度污染水平的报道,其中个别工业区周围土壤镉污染达到重度污染水平. 1991年,吴燕玉等^[9]报道了广州郊区老污灌区土壤中镉含量为228 mg/kg,达到重度污染. 1994年,苏年华等^[10]调查了福建省的土壤污染水平,镉污染指数为0.89,属于警戒级. 1997年,覃浩展^[11]报道了广西南宁市郊区土壤镉污染监测结果,该地区镉污染指数为0.78~32.5,大部分监测点达到重度污染级别.

近十年来,我国镉污染报道逐年增多,范围逐步扩大. 2001年,朱礼学^[12]研究表明,成都平原西部镉污染面积达到470 km²,大多数地区镉污染指数为1~3,属于轻度到中度污染;而郫县周边地区污染指数达到4.1,属于重度污染. 2002年,朱凤鸣等^[13]调查表明,昆明西郊受到较严重的镉污染,土壤和糙米中镉含量分别达到23.1 mg/kg和0.28 mg/kg,属于重度污染. 2007年,王济等^[14]的研究表明,贵阳全境土壤镉含量范围是0.001 mg/kg~2.620 mg/kg,全市土壤镉平均含量为0.302 mg/kg,达到轻度污染水平. 2008年,Zhai等^[15]的调查结果表明,湖南省郴州市土壤镉含量为2.72 mg/kg~4.83 mg/kg,达到重度污染水平. 2010年,Sun等^[16]对湖南省凤凰县稻田土壤镉含量调查结果表明,土壤中镉含量最高达0.53 mg/kg~14.91 mg/kg,平均为1.05 mg/kg,属于重度污染水平. 2012年,袁珊珊等^[17]研究表明,我国镉潜在污染风险最大地区为西南地区,镉矿相对丰富的云南、湖南、贵州等地区的大部分土壤已经呈现重度镉污染.

1.2 稻米污染

国家标准《食品中污染物限量,GB 2762—2012》

规定,稻米中镉含量不得超过0.2 mg/kg. 近年来,稻米镉超标现象在全国各地均有发生. 2010年,雷鸣等^[18]分析了湖南市场112份大米样品镉含量,平均为0.28 mg/kg,超过国家标准. 2011年,杨菲等^[19]调查了840份广东省市售大米样品的镉含量,5.5%的大米及其制品镉超标. 2012年,陈若虹等^[20]检测了广东省108份大米样品,14.8%的大米镉超标. 2008年,周晓萍等^[21]调查了浙江省绍兴市50份大米样品,6%的样品镉超标. 2009年,虞爱旭等^[22]检测了浙江省杭州市10份大米样品,10%的样品镉超标. 2011年,李德洁等^[23]检测了广西省柳州地区49份大米样品,4.1%的样品镉超标. 2012年,周娜等^[24]报道了福建省厦门市17份大米样品中镉超标率为11.8%. 2012年,高丽芳^[25]报道了宁夏自治区吴忠市65份大米样品中有1份镉超标,超标率为1.5%. 2011年,许瑶^[26]对安徽省110份市售大米样品调查未发现镉超标现象. 2012年,王军等^[27]分析了石家庄地区食物中重金属含量,20份大米样品中镉含量平均为0.026 mg/kg,均没有超标. 2011年,秦磊磊等^[28]分析了湖北省宜昌地区36份大米样品中的镉含量,未发现镉超标. 2012年,徐丹先等^[29]检测了52份昆明市售大米,镉含量最高为0.14 mg/kg,未超过国家标准.

调查结果表明,我国南方湖南、广东、广西、福建、浙江等地均存在大米镉超标现象,超标率约在5%~15%,而我国中部及北部地区稻米镉超标现象极少.

2 稻米镉污染治理

镉污染是制约我国水稻产业发展,威胁消费者健康的主要因素. 目前,应对稻米镉污染的方法主要有3个:第一是从源头出发,修复治理镉污染土壤;第二是从水稻品种入手,筛选种植镉积累能力低的水稻品种;第三是从产品加工角度出发,通过加工技术降低稻米及制品的镉含量.

2.1 土壤修复治理

土壤是稻米中镉的主要来源,土壤修复治理是解决稻米镉污染的根本方法. 土壤改良剂和植物修复法是镉污染土壤修复的主要方法.

2.1.1 土壤改良剂法

土壤改良剂法是向土壤中添加外源改良剂,通过改变土壤pH值、吸附钝化土壤中的镉、提高作物

生物量等作用,达到降低作物体内镉浓度的目的。刘昭兵等^[30]研究表明,与不施改良剂的对照相比,石灰施用量达到 $1\ 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤pH值显著提高,土壤有效态镉浓度降低12.6%,水稻茎叶和糙米中镉浓度可分别降低25.5%和28.3%。邓腾灏博等^[31]研究表明,钢渣作为一种碱性富硅改良剂,可以提高酸性土壤pH值,降低有效态重金属含量,减少重金属向地上部分的转运。土壤有效硅含量增加,可以促进水稻生长,降低地上部分重金属浓度。Fine等^[32]研究了乙二胺四乙酸(EDTA)和乙二胺二琥珀酸(s,s-EDDS)对镉污染土地的修复效果,结果表明,EDTA和s,s-EDDS均能螯合土壤中的镉离子,在不影响桉树(*Eucalyptus Camaldulensis*)生长的情况下,有效降低其对土壤中镉的吸收。甲卡拉铁等^[33]研究发现在受镉污染的土壤上施磷肥和钾肥可有效降低水稻籽粒和秸秆中的镉含量。董善辉等^[34]研究发现,施加磷肥可缓解镉对植株的毒害作用,增加植株的生物量,稀释水稻体内镉浓度。赵颖等^[35]研究表明,一定污染范围内,施硅除了能通过提高土壤pH值钝化镉的作用外,还能够提高铁锰氧化物态、有机结合态和残渣态等形态镉的比率,降低土壤中镉的有效性,抑制植物对镉的吸收,同时提高镉污染条件下水稻的生物量和籽粒产量,降低稻米中的镉含量。

土壤改良剂法具有投入小,见效快的优势,但也存在改良剂对土壤形成二次污染和破坏土壤自身生态平衡的风险。

2.1.2 植物修复法

植物修复技术是近年来新兴的土壤修复方法。1983年,Chaney等^[36]提出了运用植物去除土壤中重金属污染的设想,希望利用超积累植物吸附土壤中的重金属元素,净化土壤。1991年,Chaney等^[37]在明尼苏达州圣堡罗地区,利用麦瓶草属、遏蓝菜属、长叶葛芭、抗性紫羊茅等修复污染土壤,历时3年,使当地镉、锌等重金属降到了限量值以下。Baker等^[38]研究了遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)对重金属污染的土地的修复效果,证明遏蓝菜可有效的吸附土壤中的镉元素。Blaylock等^[39]研究了印度芥菜的土壤修复能力,一公顷印度芥菜每一收获季可从土壤中吸附180 kg铅元素,效果显著。林匡飞等^[40]研究了苕麻对土壤中镉元素的吸附作用,经过5年治理,土壤镉含量降低27.6%,提出了利用纺织原料植物修复重金属污染土壤的设想。Li等^[41]利用

杨桃(*Averrhoa carambola*)修复镉污染土壤,种植170 d,每公顷土壤可吸附镉213 g,照此修复效率计算,13年后即可将该土壤中的镉移除50%。目前,宝山堇菜^[42]、龙葵^[43]、鱼腥草^[44]、商陆^[45]、东南景天^[46]等超积累植物的土壤修复能力也已得到学术界的认可。

与土壤改良剂法相比,植物修复具有安全环保和投入低的优势,但植物修复周期较长,且修复植物很难产生替代粮食作物的经济价值。目前国内还没有大面积使用超积累植物来修复重金属污染土壤的应用案例。

2.2 筛选低镉积累水稻品种

除土壤环境外,品种是影响水稻镉积累的重要因素。研究筛选低镉积累水稻品种,是解决稻米镉超标问题的有效途径之一。

Morishita等^[47]发现相同土壤环境下生产的粳稻、籼稻、爪哇稻和杂交稻籽粒镉含量存在显著差异,其中杂交稻镉平均含量最高,而爪哇稻镉平均含量最低。曾翔等^[48]研究了46种水稻对镉的积累能力,结果表明不同品种水稻的镉含量存在显著差异,其中,特种稻镉积累能力最强,而爪哇稻镉积累能力最弱。为揭示镉积累能力差异原因,日本学者研究了与镉积累相关的水稻基因。Ueno等^[49]研究发现,OsHMA3基因指导合成的蛋白质对于防止镉在稻米中蓄积发挥了重要作用,OsHMA3基因合成的蛋白质可以将镉固定于水稻根部的液泡中,减少镉向水稻地面部分的运输,从而有效减少稻米籽粒中的镉含量。Sasaki等^[50]研究发现,亚洲水稻(*Oryza sativa*)Nramp5基因所编码的蛋白质是影响水稻镉吸收的重要因素,去除该基因的稻米镉含量不到对照组的1/10。这为开发基因改良型水稻奠定了基础。

通过水稻类型和品种镉积累能力研究,目前已经筛选出了越路早生^[51]、武育粳3号、武育粳7号^[52]、Nipponbare^[53]等低镉积累品种。由于筛选出的低镉积累水稻受地域适应性和产量的限制,这些品种均没有大面积推广。

2.3 镉污染稻米加工利用

镉污染稻米进入食物链会威胁消费者健康,简单丢弃则会造成环境二次污染。开发镉污染稻米加工利用技术,降低稻米加工产品中的镉含量,可有效解决镉污染稻米的利用难题。

开发镉污染稻米加工利用技术,首先要确定镉在稻米中存在部位和赋存方式。杨居荣等^[54-55]通过物理剥离方法对稻米进行解剖,分离出皮层、胚和

胚乳,分别测定其镉含量.表明镉在稻米中的浓度顺序为皮层>胚>胚乳. Liu等^[56]研究结果表明,整个稻米籽粒中40%的镉富集在占稻米总重9%的米糠(糊粉层)中,而占稻米总重71%的糙米(胚乳)中仅富集了45%的镉.糊粉层是稻米籽粒蛋白质的主要富集部位,推测稻米中镉的存在部位与蛋白质密切相关^[57-58].杨居荣等^[54]研究表明,镉在稻米中主要与蛋白质结合,与淀粉结合较少.查燕等^[55]利用连续提取法,研究了镉与不同种类蛋白的结合能力,证明镉主要与谷蛋白和球蛋白结合.杨居荣等^[59]发现醇溶蛋白提取液中镉含量较低,证明镉与醇溶蛋白的结合能力较弱.何孟常等^[60]通过凝胶层析法分析了稻米中的镉-蛋白配位化合物,发现镉-蛋白配位化合物的表观分子量约为54.5 ku和5.5 ku.对镉结合蛋白的成分分析结果表明,其主要由谷氨酸、半胱氨酸和甘氨酸构成,基本不含有芳香族氨基酸,推测籽粒中镉易与富硫蛋白质结合.

现有研究证实,镉在稻米籽粒中的分布具有不均一性,主要分布于稻米糊粉层中,并与蛋白质结合.查燕等^[61]研究了碾米加工工艺对稻米镉污染去除的效果,证明提高碾米精度,去除稻米糊粉层,可在一定程度上降低大米镉含量.由于缺乏镉与蛋白质的螯合物结构的研究,目前还没有开发出能有效去除稻米中镉元素的方法.

3 结论与展望

由于缺乏权威性的全国镉污染现状调查研究,无法确定我国镉污染土地的总面积和镉污染稻米的总量.分析近期研究报道,我国土壤镉污染程度逐年增加,范围逐步扩大,湖南、广西、贵州等局部地区土壤镉污染程度较重.我国湖南、广东、广西、福建、浙江等地均存在稻米镉超标现象.由于北方耕地土壤中的镉含量普遍低于南方,且多种植镉积累较低的粳稻,我国北方地区稻米镉超标现象较少.

减少污染排放,治理修复污染土壤是解决稻米镉污染问题的根本方法;筛选低镉积累水稻品种是快速解决稻米镉污染问题的有效手段;开发镉污染稻米加工利用技术是解决镉超标稻米利用问题的应急之策.由于现行的各种方法均存在一定的局限性,目前还没有一套方法可以有效解决稻米镉污染问题.为进一步解决稻米镉污染问题,今后的研究应集中在:1)培育生物量大、镉吸附能力强、具有一

定经济效益的超积累植物,用于土壤修复;2)研究影响水稻吸收镉的基因,培育镉吸附能力低,适宜大面积推广的水稻品种;3)分析镉在稻米中的富集部位和赋存形态,开发镉污染稻米加工利用技术,解决镉污染稻米的利用难题.

参考文献:

- [1] 张丛,夏立江. 污染土壤生物修复技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000:1-326.
- [2] 国土资源部. 我国1.5亿亩耕地遭污染[J]. 环境保护,2007(4):21.
- [3] 李雪林,张晓燕. 中国1/5耕地受重金属污染土壤污染法正酝酿[J]. 资源与人居环境,2010(3):50.
- [4] 王静,林春野,陈瑜琦,等. 中国村镇耕地污染现状原因及对策分析[J]. 中国土地科学,2012,26(2):25-30.
- [5] 王云,魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996:1-394.
- [6] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤背景值研究[J]. 环境科学,1991(4):12-19.
- [7] 陈涛,吴燕玉,张学询,等. 张土灌区镉土改良和水稻镉污染防治研究[J]. 环境科学,1980,5(5):7-11.
- [8] 王凯荣,张玉焯,胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报,2007,26(2):476-481.
- [9] 吴燕玉,周启星,田均良. 制定我国土壤环境标准(汞、镉、铅和砷)的探讨[J]. 应用生态学报,1991,2(4):344-349.
- [10] 苏年华,张金彪,王玉. 福建省土壤重金属污染及其评价[J]. 福建农业大学学报,1994,23(4):434-439.
- [11] 覃浩展. 南宁市郊土壤及作物重金属污染状况研究[J]. 广西农学报,1997(4):1-4.
- [12] 朱礼学. 成都平原西部土壤中镉的分布与镉污染[J]. 四川环境,2001,20(2):41-43.
- [13] 朱凤鸣,邹学贤,刘芳. 昆明西郊镉污染对人体健康的影响[J]. 中国卫生检验杂志,2002,12(5):602-603.
- [14] 王济,王世杰,欧阳自远. 贵阳市表层土壤中镉的环境地球化学基线研究[J]. 环境科学,2007,28(6):1344-1348.
- [15] Zhai L M, Liao X Y, Chen T B, et al. Regional assessment of cadmium pollution in agricultural lands and the potential health risk related to intensive mining activities: A case study in Chenzhou City, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6): 696-703.

- [16] Sun H F, Li Y H, Ji Y F, et al. Environmental contamination and health hazard of lead and cadmium around Chatian mercury mining deposit in western Hunan Province China[J]. Trans Nonferrous Metal Social China, 2010,20:308-314.
- [17] 袁珊珊,肖细元,郭朝晖. 中国镉矿的区域分布及土壤镉污染风险分析[J]. 环境污染与防治,2012,34(6):51-56.
- [18] 雷鸣,曾敏,王利红,等. 湖南市场和污染区稻米中 As Pb Cd 污染及其健康风险评估[J]. 环境科学学报,2010:30(11):2314-2320.
- [19] 杨菲,白卢哲,梁春穗,等. 2009年广东省市售大米及其制品镉污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志,2011,23(4):358-362.
- [20] 陈若虹,张军,凌东辉,等. 2009年广州市海珠区餐饮单位大米中铅镉砷污染现状及膳食暴露评估[J]. 中国卫生检验杂志,2012,22(2):318-319.
- [21] 周晓萍,陈志军,王立媛,等. 2005年浙江省绍兴市食品中铅镉砷铝污染现状及分析[J]. 疾病监测,2008,23(2):100-106.
- [22] 虞爱旭,曾文芳,任韧,等. 2007年浙江省杭州市食品中铅镉汞砷污染现状及分析[J]. 中国卫生检验杂志,2009,19(2):382-384.
- [23] 李德洁,李华茜,卢小玲. 柳州地区部分食品中铅和镉污染监测与评价[J]. 职业与健康,2011,27(9):1003-1004.
- [24] 周娜,白艳艳,王文伟,等. 2008—2011年厦门市食品中重金属污染状况调查[J]. 实用预防医学,2012,19(5):701-703.
- [25] 高丽芳,齐欢宁,杨兴林,等. 吴忠市2011年粮食中铅镉含量检测报告[J]. 医学动物防制,2012,28(11):1287-1288.
- [26] 许瑶. 安徽省市售大米铅镉汞污染状况及健康风险评估[J]. 江西食品工业,2011(3):32-33.
- [27] 王军,曹丽玲,王丽. 石家庄地区2010年食物中重金属污染调查分析[J]. 医学动物防制,2012,28(6):675-677.
- [28] 秦磊磊,李素媛,陈聪,等. 宜昌地区大米中镉含量的调查研究[J]. 现代农业科技,2011(17):326.
- [29] 徐丹先,金莉,孙灿. 昆明市市售大米中镉含量调查分析[J]. 中国卫生检验杂志,2012,22(5):1145-1146.
- [30] 刘昭兵,纪雄辉,田发祥,等. 石灰氮对镉污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(10):1513-1517.
- [31] 邓腾灏博,谷海红,仇荣亮. 钢渣施用对多金属复合污染土壤的改良效果及水稻吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):455-460.
- [32] Fine P, Rathod P H, Beriozkin A, et al. Uptake of cadmium by hydroponically grown, mature *Eucalyptus camaldulensis* saplings and the effect of organic ligands [J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(6):585-601.
- [33] 甲卡拉铁,喻华,冯文强,等. 不同磷钾肥对水稻产量和吸收镉的影响研究[J]. 西南农业学报,2009,22(4):990-995.
- [34] 董善辉,李军,赵梅. 磷对镉污染土壤中水稻吸收积累镉的影响[J]. 东北农业大学学报,2010,41(9):39-43.
- [35] 赵颖,李军. 硅对水稻吸收镉的影响[J]. 东北农业大学学报,2010,41(3):59-64.
- [36] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents [J]. Land Treatment of Hazardous Wastes, 1983:50-76.
- [37] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997,8(3):279-284.
- [38] Baker A J M, Reeves R D, Hajjar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. and C. Presl (Brassicaceae) [J]. New Phytologist, 1994, 127(1):61-68.
- [39] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et al. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents [J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(3):860-865.
- [40] 林匡飞,张大明,李秋洪,等. 苎麻吸镉特性及镉土的改良试验[J]. 农业环境保护,1996,15(1):1-4.
- [41] Li J T, Liao B, Dai Z Y, et al. Phytoextraction of Cd-contaminated soil by *Carambola* (*Averrhoa carambola*) in field trials [J]. Chemosphere, 2009, 76(9):1233-1239.
- [42] 刘威,束文圣,蓝崇钰. 宝山堇菜 (*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物 [J]. 科学通报, 2003, 48(19):2046-2049.
- [43] 魏树和,周启星,王新,等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(24):2568-2573.
- [44] 侯伶龙,黄荣,周丽蓉,等. 鱼腥草对土壤中镉的富集及根系微生物的促进作用 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(4):817-821.
- [45] Liu X, Peng K, Wang A, et al. Cadmium accumulation and distribution in populations of *Phytolacca americana* L. and the role of transpiration [J]. Chemosphere, 2010,78(9):1136-1141.
- [46] Yang X E, Long X X, Ye H B, et al. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance) [J]. Plant

- and Soil, 2004, 259(12): 181-189.
- [47] Morishita T, Fumoto N, Yoshizawa T, et al. Varietal differences in cadmium levels of rice grains of japonica, indica, javanica, and hybrid varieties produced in the same plot of a field[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1987, 33(4): 629-637.
- [48] 曾翔, 张玉焯, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 67-69.
- [49] Ueno D, Yamaji N, Kono I, et al. Gene limiting cadmium accumulation in rice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(38): 16500-16505.
- [50] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. Plant Cell, 2012, 24(5): 2155-2167.
- [51] 刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 等. 东北地区不同水稻品种对Cd的累积特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 220-227.
- [52] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究——品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1346-1352.
- [53] Arao T, Ishikawa S. Genotypic differences in cadmium concentration and distribution of soybean and rice[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2006, 40(1): 21-30.
- [54] 杨居荣, 查燕, 刘虹. 污染稻麦籽实中Cd Cu Pb的分布及其存在形态初探[J]. 中国环境科学, 1999, 9(6): 500-504.
- [55] 杨居荣, 查燕, 刘虹, 等. 污染稻麦籽实中镉和铅的分布及其存在形态[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2000, 36(2): 268-273.
- [56] Liu J G, Qian M, Cai G L. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143: 443-447.
- [57] 于辉, 杨中艺, 杨知建, 等. 不同类型镉积累水稻细胞镉化学形态及亚细胞和分子分布[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2221-2226.
- [58] Hansen T H, Lombi E, Fitzgerald M. Losses of essential mineral nutrients by polishing of rice differ among genotypes due to contrasting grain hardness and mineral distribution[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 307-315.
- [59] 杨居荣, 何孟常, 查燕. 稻麦籽实中Cd的结合形态[J]. 中国环境科学, 2000, 20(5): 404-408.
- [60] 何孟常, 杨居荣. 水稻籽实中蛋白质-Cd Pb结合体及其稳定性[J]. 环境科学学报, 2011, 21(2): 213-217.
- [61] 查燕, 杨居荣, 刘虹, 等. 污染谷物中重金属的分布及加工过程的影响[J]. 环境科学, 2000, 5(3): 52-55.

Cadmium Contamination in Rice and Cadmium Control Technology

WEI Yi-min, WEI Shuai, GUO Bo-li, TIAN Yang

(Institute of Agro-products Processing Science and Technology/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100193, China)

Abstract: Cadmium (Cd), a kind of heavy metal pollutant, can enter the food chain through soil, dust, and crops. As a staple crop in China, rice can easily enrich Cd from soil, which can represent a health risk to consumers. Cd concentration in soil shows obvious heterogeneity in China. Cd concentration in rice is over the limit in some regions of China, due to the geological environment or soil pollution. At present, remedying polluted soil, screening low-accumulation material, and processing polluted rice have been developed to deal with Cd contamination. This paper summarized the present situation of cadmium contamination in rice and soil, analyzed the main factor of Cd enrichment in rice, reviewed the control technology of Cd contamination, and provided suggestions on Cd contamination research.

Key words: rice; soil; Cadmium; contamination; control technology

(责任编辑:叶红波)